

网络出版时间:2016-03-14 08:45 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.04.029
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160314.0845.058.html

弧底梯形渠道无喉道量水槽水力特性的数值模拟

钟新铭,马孝义,王文娥,许坤鹏,樊 琨

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] **【目的】**研究弧底梯形渠道无喉道量水槽的水力特性,为灌区水资源的科学管理和可持续利用提供参考依据。**【方法】**利用 Fluent6.3 大型计算流体力学软件,基于 VOF 方法跟踪自由液面,采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流数学模型和 PISO 算法,对不同收缩比条件下的弧底梯形渠道无喉道量水槽进行三维数值模拟,分析了弧底梯形渠道无喉道量水槽内部流场以及水位流量关系,将模拟结果和实测资料对比验证,同时进一步分析了弗劳德数、临界淹没度等量水槽各项水力性能。**【结果】**与传统无喉道量水槽相比,弧底梯形渠道无喉道量水槽具有显著优点:(1)量水槽结构简单,过流顺畅且呈良好的流线型;(2)临界淹没度(S)可达 0.89,水头损失小,弗劳德数(Fr) <0.5 ,满足测流精度要求;(3)量水槽水位流量关系相关性较好,拟合公式测流平均误差小于 5%。**【结论】**弧底梯形渠道无喉道量水槽结构可为灌区弧底梯形渠道量水提供新的思路和参考依据。

[关键词] 弧底梯形渠道;无喉道量水槽;水力特性;数值模拟

[中图分类号] TV135.3

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)04-0218-07

Numerical simulation of hydraulic properties of cut-throat flow measuring flume on trapezoidal canal with arc bottom

ZHONG Xin-ming, MA Xiao-yi, WANG Wen-e, XU Kun-peng, FAN Kun

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** The hydraulic properties of cut-throat flow measuring flume on trapezoidal canal with arc bottom were investigated to provide reference for the scientific management and sustainable use of irrigation water resources. **【Method】** According to RNG $k-\epsilon$ turbulent model and PISO algorithm based on VOF free surface tracking method, the fluid in cut-throat flow measuring flume on trapezoidal canal with arc bottom was simulated by Fluent6.3. The relationships between upstream water level and discharge, Froude, head loss and the critical submergence were analyzed. **【Result】** Compared with traditional cut-throated flume, the cut-throat flow measurement flume on trapezoidal canal with arc bottom had following significant advantages: simple structured, well streamlined, and high critical submerged ratio. The relationship between upstream water level and discharge was significant with standard error of less than 5%, small head loss and the critical submergence degree of 0.89. **【Conclusion】** The structure of cut-throat flow measurement flume on trapezoidal canal with arc bottom could provide new ideas and reference.

Key words: trapezoidal canal with arc bottom; cut-throat flow measuring flume; hydraulic characteristics; numerical simulation

[收稿日期] 2014-08-19

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51279167);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD08B01);“十二五”国家“863”计划项目(2011AA100509)

[作者简介] 钟新铭(1987—),男,江西万安人,在读硕士,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:zxmhong55@163.com

[通信作者] 马孝义(1965—),男,陕西凤翔人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。

E-mail:xiaoyima@vip.sina.com

随着水资源的开发利用和水费制度的改革,水的计量不仅涉及工农业用水,而且涉及千家万户。依法用水、准确计量、按量收费是我国水资源管理的一项基本制度,发展节水型农业已成为一项基本战略。在农业节水灌溉各项技术的推广应用,渠道量水是一项基础的、关键性的措施,高效节水和水价制度改革迫切需要一种结构简单、设计合理、精度高的渠道量水设施^[1-2]。弧底梯形渠道由于具有水流条件好、便于输沙、结构受力条件好、冻胀力分布均匀、抗冻胀性能好、结构复位能力强、工程耐久性长等特点,在北方灌区应用非常广泛^[3]。但与之相应的量水配套设施的研究并没有得到足够的重视,为适应我国灌区渠道不同断面形式和管理方式,开发研制新型量水槽任重道远。无喉道量水槽具有结构简单、过流能力强等优点,目前已在矩形和 U 形渠道中广泛应用^[4-5],对解决这些渠道的量水问题做出了很大贡献,但应用中也暴露出易产生淹没出流、计算公式复杂等不足。目前,对无喉道量水槽设计、研发主要采用试验方法^[6-7],但试验易受物理模型局限,研制周期长、人力物力投入大,而水力模拟仿真相对物理模型试验则具有高效、低成本的特点,能够提高新型量水设施的研发效率。

计算流体力学(CFD)已广泛用于水流运动特性的分析研究^[8]。郝晶晶等^[9]、尹京川等^[10]运用 VOF 模型分别对 U 形渠道抛物线型无喉量水槽和矩形无喉段量水槽进行了三维数值模拟,结果表明数值

计算方法可以有效地模拟水面、流速等水力特性,但对于量水槽的各项水力性能并未进一步深入研究。本研究以某灌区渠系弧底梯形渠道改造工程为原型,针对弧底梯形渠道特点提出与之相适应的无喉道量水槽的新形式,并在不同底坡明渠均匀流条件下进行数值试验研究及量水槽水力性能的深入分析,以期量为量水槽结构的优化设计和野外试验提供一定的参考及建议。

1 物理模型与数值计算方法

1.1 物理模型

弧底梯形渠道无喉道量水槽由进口段、出口段两部分组成,进口收缩段呈 3 : 1 收缩,出口扩散段呈 6 : 1 扩散。针对弧底梯形渠道断面特点,本研究提出了弧底梯形渠道无喉道量水槽收缩比(ξ)的概念,即可以调整喉口断面弧底半径 R 、渠深 H 、边坡系数 m ,使得 ξ 等于量水槽形成侧收缩的喉口断面面积 A_0 与渠道断面面积 A 之比,即 $\xi=A_0/A$ 。弧底梯形渠道断面无喉量水槽结构如图 1 所示。弧底梯形无喉量水槽通过进口收缩段,使水流侧向或垂向产生收缩,从而缩窄水力断面,当水流通过时,只要喉口宽度合理,便可以产生平稳的水面跌落,使其产生临界水流状态,使流量与上游来流水头形成单一稳定的水位-流量关系,从而达到测流的目的。

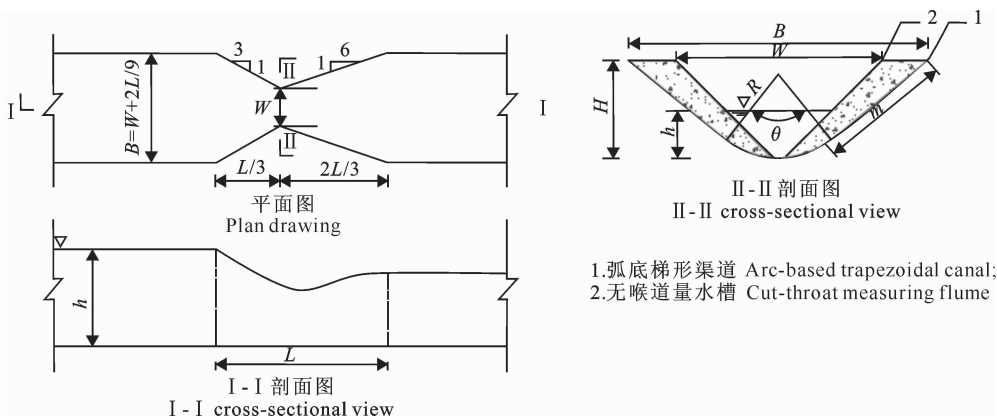


图 1 弧底梯形渠道无喉道量水槽的结构示意图

Fig. 1 Schematic of cut-throat measuring flume on trapezoidal canal with arc bottom

1.2 弧底梯形渠道设计流量

弧底梯形渠道设计流量 $Q_{\text{设}}$ 为设计水位下不同断面尺寸、糙率、底坡时的渠道流量,可按式计算:

$$Q_{\text{设}}=AV=AC\sqrt{Ri}=\frac{A}{n}R^{2/3}i^{1/2}。 \tag{1}$$

式中: $Q_{\text{设}}$ 为渠道设计流量, A 、 V 分别为弧底梯形渠道面积及渠道流速; C 为谢才系数,与断面形状、尺寸及边壁糙率 n 有关; i 为渠道底坡。弧底梯形渠槽具体尺寸设计见表 1。

表 1 弧底梯形渠道及无喉道量水槽参数

Table 1 Parameters of cut-throat measuring flume on trapezoidal canal with arc bottom

弧底梯形渠道断面参数 Cross section of the canal				弧底梯形无喉道量水槽设计参数 The design of measuring flume			
底弧半径(R)/m Bottom arc radius	渠高(H)/m Channel height	渠道边坡系数(m_1) Channel slope coefficient	收缩比(ξ) Contraction ratio	喉宽(W)/m Throat width	槽长(L)/m Flume length	喉道边坡系数(m_2) Slope coefficient	底坡(i) Bottom slope
120	140	1.25	0.74	3.30	4.50	1	1/1 000~1/1 200
			0.69	3.18	5.04	1	1/1 000~1/1 400
			0.65	3.06	5.49	1	1/1 000~1/1 500
			0.61	2.96	6.03	1	1/1 000~1/2 000

1.3 数值计算方法

CFD 分析描述水流的时均控制方程包括连续方程、动量方程。

连续方程为：
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0。 \tag{2}$$

式中： ρ 为流体密度， t 为时间， u_i 为沿 i (i 为笛氏坐标 x 、 y 或 z) 方向的速度分量， x_i 为沿 i 方向的空间坐标分量。

动量方程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) &= \frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) &+ s_i。 \end{aligned} \tag{3}$$

式中： u_i 、 u_j 分别为沿 i 和 j 方向的速度分量， p 为压力， x_i 、 x_j 分别为沿 i 和 j 方向的坐标分量， μ 为黏性系数， $\overline{u_i'}$ 、 $\overline{u_j'}$ 为沿 i 和 j 方向的脉动流速分量， s_i 为单位体积上体积力。

针对带有弯曲壁面的流动，应用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型会出现一定失真，因此本研究采用 $k-\epsilon$ 湍流模型使控制方程组封闭。水流湍流脉动的动能 k 和紊流动能耗散率 ϵ 的计算方法如下。紊流动能 k 方程：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k (\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \epsilon。 \tag{4}$$

式中： k 为紊流动能， μ 为黏性系数， μ_t 为湍动黏度， $\alpha_k=1.39$ ， G_k 为由平均速度梯度引起的紊动能产生项， $G_k=\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ ， ϵ 为紊流动能耗散率。

湍动黏度 μ_t 可由 k 、 ϵ 求出，即：

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}。 \tag{5}$$

式中： $C_\mu=0.0845$ 。

对紊流动能耗散率 ϵ ，有：

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$C_{1\epsilon}^* \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}。 \tag{6}$$

式中： $\alpha_\epsilon=\alpha_k=1.39$ ； G_k 为由平均速度梯度引起的紊动能产生项； $C_{1\epsilon}^*=C_{1\epsilon}-\frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$ ，其中 $C_{1\epsilon}=1.42$ ， $C_{2\epsilon}=1.68$ ， $\eta_0=4.377$ ， $\beta=0.012$ ， η 可以按下式计算：

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\epsilon}。 \tag{7}$$

式中： E_{ij} 为时均应变率。

1.4 模型描述与网格划分

为了逼真地模拟渠道流态，减小上下游边界对计算域的影响，模拟选取渠道长 25 m 左右，渠槽建模时取顺水流方向为 X 轴(顺水流为正)，宽度方向为 Y 轴(向右为正)，高度方向为 Z 轴(向上为正)，坐标原点取在渠道进口断面($X=0$) 圆弧中心处。量水槽上游渠道取 10~15 m，下游渠道取 15 m，在量水槽段采用非结构网格，渠道段采用结构网格单元进行剖分，因渠道左右对称，可取一半计算域，网格总数约 4.5×10^5 个单元。利用 AUTOCAD2010 建立量水渠槽三维模型，联合 gambit 进行网格划分和边界条件设置。

量水槽进口边界分别由空气进口和水流进口两部分组成，空气进口边界条件设置压力进口边界，水流进口设置速度进口边界，水流进口给出水深 H 、进口流速分布、湍流动能 k 和湍流动能耗散率 ϵ ^[11]。出口设压力出口边界，渠道断面中心面取对称面，渠道的整个底部以及边壁选择固壁边界条件，并设置无滑移选项，采用标准的壁面函数法处理。

2 结果与分析

整个模拟在水平的和有坡的渠道进行，初始流场中充满气体，根据各个水位流量工况对数值模型进行预处理和流场初始化，采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流方程封闭雷诺时均 N-S 方程，VOF^[12-13] 方法跟踪自由表面，对离散方程组的压力速度耦合采用瞬态 PISO

算法,水流从入口流入渠槽直至出口,通过对体积分数的迭代求解,就能够自动生成水气的交界面,设置监视器中的 Mass Flow Rate 选项,当其值接近于 0 且基本保持不变时,认为计算收敛。采用 CFD 软件之 Fluent 6.3 对建立好的三维模型进行仿真计算。

2.1 断面水流流速及水面线分析

分析底坡 $i=1/1\ 000$, 收缩比 $\xi=0.65$, 流量 $Q=1.25\ \text{m}^3/\text{s}$ 时水流流速和水位的分布。分别在量水槽上游、量水槽进口段、量水槽出口段和量水槽下游段选取 4 个特征断面(图 2),从渠道上游到下游沿 X 轴 4 个特征横断面 1-1、2-2、3-3、4-4 上的水位和流速分布见图 3。图 3 表明,在量水槽上游渠道(1-1 断面),处于缓流状态,水流平稳,流速分布均匀,水深断面呈中间低两边高的趋势,这是因为中部沿 X 方向顺水流流速较两侧水流流速大;在量水槽

进口段(2-2 断面),水深断面形成中间明显比两边低的趋势,由于量水槽进口段侧向收缩,水面形成纵向跌落,流速分布不均且中间流速比两边流速大;在量水槽出口段(3-3 断面),由于沿程水面形成较大落差,水流表面开始紊动,流速分布不均,可以看出水面线是中间最高,然后逐渐向边壁降低,在壁面处达到最低,究其原因,边壁处水流受边界摩擦影响较大,属于低流速区;在量水槽出口段到下游渠道之间,属于‘孤岛’(高流速)分布区,水面达到最低,流速达到最大,与下游主流交界面附近产生漩涡,从而导致水流激烈湍动、混掺^[14],水流要素急剧变化;到了量水槽下游段(4-4 断面),水流慢慢趋于平稳,流速分布也相对均匀、稳定。分析沿程水位流速分布,可为水头损失等计算提供依据,上游水头、流速分布可为量水槽水位流量关系计算等提供依据。

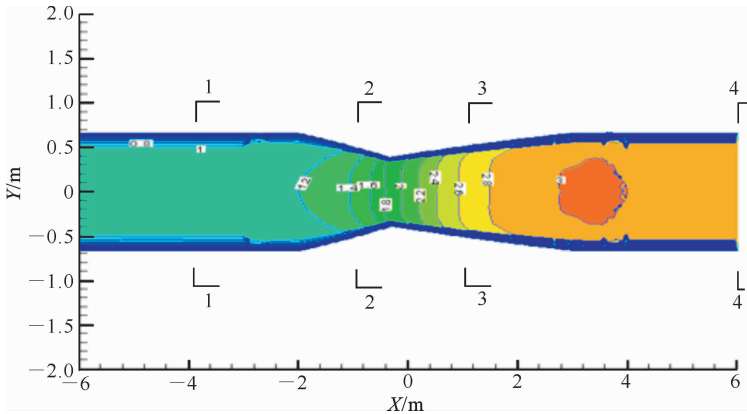


图 2 20 cm 高弧底梯形无喉道量水槽的沿程流速分布以及各断面具体位置
Fig.2 Velocity distribution of cut-throat measuring flume on trapezoidal canal with arc bottom and location of each section

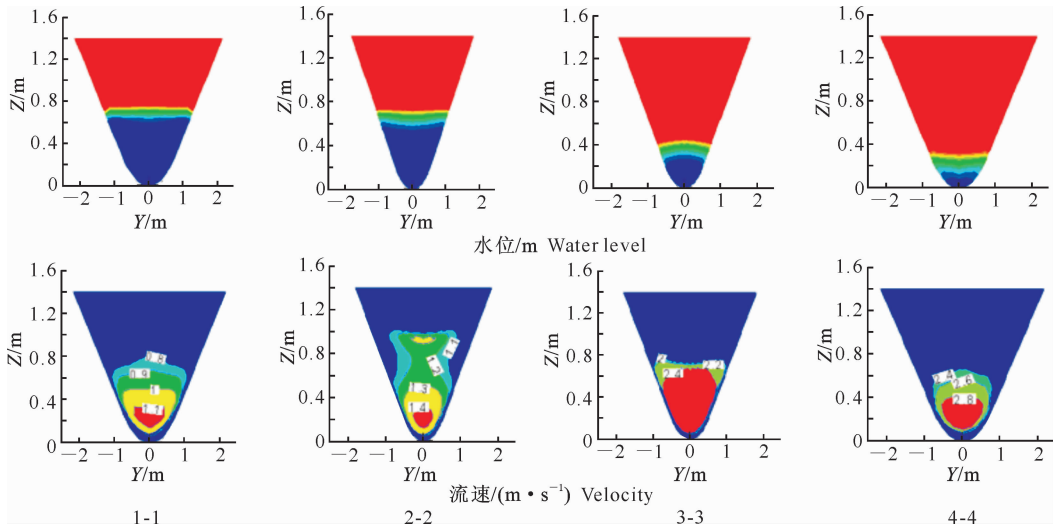


图 3 渠道 1-1、2-2、3-3、4-4 断面水位和流速的分布
Fig.3 Water surfaces and velocity distribution at different cross-sections

2.2 水位流量关系经验公式及误差分析

试验模拟了 4 种弧底梯形渠道无喉道量水槽不同流量工况下的水位流量关系,模拟结果显示,水位流量相关性较好,通过数据分析可知,流量和相对水头 h/L (其中 h 为上游水位, L 为量水槽顺水流长度) 与收缩比 ξ 有关,对流量数据进行回归分析,得到流量与相对水头和收缩比之间的经验公式为:

$$Q=41.64\left(\frac{h}{L}\right)^{2.14}\xi^{-1.46}, R^2=0.9794。(8)$$

式中: Q 为不同收缩比工况下的弧底梯形无喉量水槽的过流流量, h 为上游水位, L 为量水槽顺水流长度, ξ 为不同量水槽收缩比。

表 2 喉宽(W)×喉长(L)为 3.06 m×5.49 m 时的渠道实测流量、
模拟流量和公式计算流量的比较

Table 2 Comparison of calculated and simulated flows with canal flow under $W\times L=3.06\text{ m}\times5.49\text{ m}$						
上游水深(h)/m Water height	实测流量(Q_c)/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Canal flow	模拟水深(h)/m Simulated water height	模拟水深对应流量(Q_s) Simulated flow		公式计算流量(Q) Calculated flow	
			测定值/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Value	相对误差/% Relative error	测定值/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Value	相对误差/% Relative error
0.4	0.322 9	0.401 4	0.292 9	9.26	0.289 5	10.35
0.5	0.509 9	0.504 4	0.474 6	6.93	0.472 1	7.41
0.6	0.742 8	0.610 1	0.706 0	4.95	0.709 2	4.53
0.7	1.024 2	0.715 7	0.998 7	2.49	0.997 9	2.57
0.8	1.357 3	0.816 8	1.327 0	2.23	1.324 2	2.44
0.9	1.744 9	0.919 9	1.735 6	0.50	1.707 8	2.13

2.3 临界淹没度

临界淹没度 S 定义为下游水位即将影响上游水位时量水槽上下游水位的比值^[15], 试验中对弧底梯形无喉段量水槽的淹没度 S 进行模拟, 在底坡 $i=1/1\,000$ 、收缩比 $\xi=0.69$ 、流量 $Q=1.259\,9\text{ m}^3/\text{s}$ 工况下的模拟过程如图 4 所示。图 4 显示, 经过第一次水位调节后, 量水槽仍处于自由出流状态, 此时上游水位不变, 在第 2 次调节后, 量水槽达到临界出流状态, 此时下游水位开始影响到上游水位, a 线代表

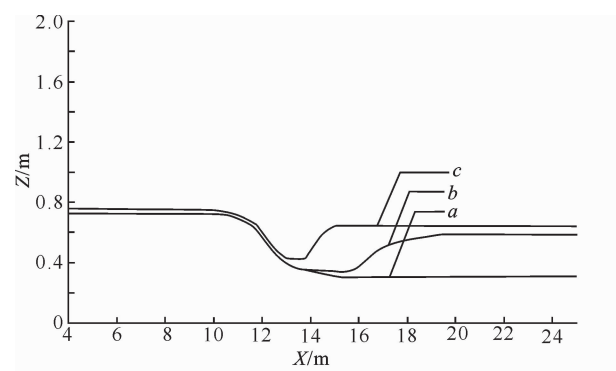


图 4 下游壅水对上游水位的影响
Fig. 4 Effects of back water downstream on
upstream water depth

为了验证数值模拟的正确性以及公式是否满足测流精度, 选取槽型喉宽×喉长 ($W\times L$) 为 $3.06\text{ m}\times5.49\text{ m}$ 的量水槽作为验证, 将渠道实测流量 Q_c 与模拟流量 Q_s 及根据公式 (8) 所得计算流量 Q 进行比较, 结果见表 2。从表 2 可以看出: 除 $h=0.4\text{ m}$ 时渠道流量与模拟、计算流量误差相对较大外, 其余渠道流量与模拟流量、计算流量的误差都控制在较小的范围内, 说明渠道流量与模拟流量、计算流量基本吻合, 模拟具有一定的可靠性, 拟合公式测流平均误差小于 5%, 建立的自由出流状态下的量水槽流量公式满足测流精度要求且简单实用。

第 1 次调节渠道纵断面水面线, b 线和 c 线分别代表 2 次壅水直至过槽水流开始出现临界状态时的水面线和第 3 次调节水位时出现淹没出流时的水面线。不同收缩比 ξ 时临界淹没度 S 与流量 Q 的关系如图 5 所示。图 5 表明, 弧底梯形无喉道量水槽试验临界淹没度最高可达 0.89, 平均临界淹没度为 0.82, 表明弧底梯形无喉量水槽具有较宽的自由出流范围, 不易造成淹没出流。

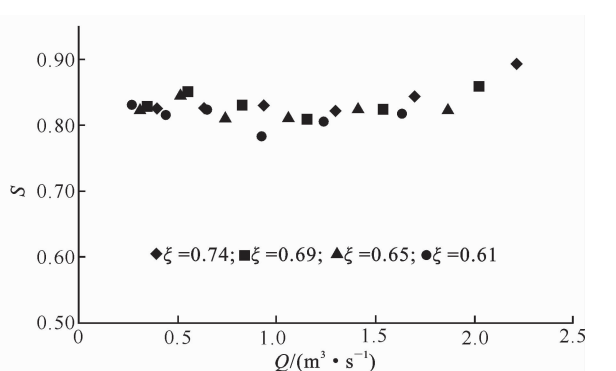


图 5 不同收缩比(ξ)时临界淹没度(S)与流量(Q)的关系
Fig. 5 Relationship between critical submergence and
flow at different contraction ratios ξ

2.4 弗劳德数(Fr)

如果量水槽上游过水断面的流速水头不是很大,就能减少水头测量的误差源,保证水深的正确测量进而保证测流精度,所以量水槽上游过水断面的流速水头不应太大^[16]。试验结果(图 6)表明,同一收缩比时, Fr 随流量的增加变化不大。但在同一流量时,收缩比的增加会使槽前弗劳德数有所增加。量水槽的槽前水流较为平稳,水面波动很小,本试验中所有收缩比下量水槽上游断面的弗劳德数 $Fr<0.5$,槽前流速小,满足明渠测流要求。

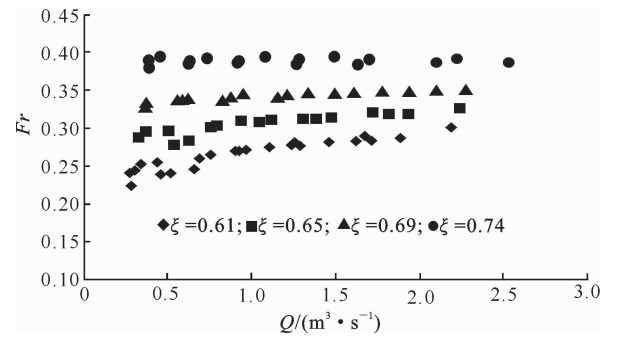


图 6 不同收缩比(ξ)时弗劳德数(Fr)的变化
Fig. 6 Changes of Froude number under different ξ

2.5 水头损失

弧底梯形无喉量水槽水头损失包括局部水头损

失和沿程水头损失。当局部水头损失远远大于沿程水头损失时,主要考虑局部水头损失,局部水头损失主要包括量水槽上游到量水槽收缩段、量水槽段、量水槽出口扩散段到量水槽下游段(高速区有漩涡)的水头损失。选择与图 2、3 相同的 4 个特征断面为研究对象,以下游出口处渠底做水平面定为参考面,则量水槽过流局部水头损失可表示为:

$$h_j=(z_1-z_2)+(h_1-h_2)+\left(\frac{v_1^2}{2g}-\frac{v_2^2}{2g}\right)。(9)$$

式中: h_j 为两控制断面之间的局部损失,m; z_1 为参考面到量水槽上游控制断面渠底的距离,m; z_2 为参考面到量水槽下游控制断面渠底的距离,m; h_1 为上游渠道水位,m; h_2 为下游渠道水位,m; v_1 为上游渠道断面平均流速,m/s; g 为重力加速度,m/s²; v_2 为下游渠道断面平均流速,m/s。

研究弧底梯形无喉道量水槽在不同收缩比时流量与水头损失系数之间的关系见表 3。表 3 结果表明:同一收缩比时,水头损失随着流量的增大而减小;同一流量不同收缩比时,量水槽尺寸越大即收缩比越大,水头损失越小; $\xi=0.61\sim0.74$ 时,平均相对水头损失(水头损失 h_j 占上游总水头 h 的比值)为 7.95%,小于长喉道量水槽的 13%。

表 3 不同收缩比(ξ)时水头损失 h_j 与流量 Q 的关系
Table 3 Relationship between h_j and Q under different contraction ratios ξ

收缩比(ξ) Contraction ratio	流量(Q)/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	上游断面平均 流速(v_1)/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) Mean velocity of upstream cross-section	下游断面平均流速 (v_2)/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) Mean velocity of downstream cross-section	局部水头 损失(h_j)/m Head loss	相对水头 损失(h_j/h)/% Relative head loss
0.61	0.511 1	0.60	2.53	7.86	12.61
	0.905 4	0.73	2.80	5.43	7.42
	1.249 8	0.81	3.02	4.53	5.40
0.65	0.623 4	0.69	2.35	8.13	13.61
	0.935 4	0.81	2.74	3.21	4.62
	1.308 0	0.84	2.89	4.48	5.50
0.69	0.620 5	0.79	2.21	4.27	7.85
	0.946 5	0.88	2.45	5.56	8.36
	1.328 5	0.96	2.76	3.60	4.60
0.74	0.624 4	0.89	2.02	4.76	9.02
	0.924 4	0.98	2.31	4.91	7.70
	1.288 0	1.06	2.54	4.22	5.68

3 结 论

1)对弧底梯形无喉量水槽物理模型进行数值求解,结果表明,Fluent6.3 大型计算流体力学软件计算结果与渠道实测流量吻合较好,表明上述模拟方法可以快速、可靠地对其设计参数和内部水力特性进行数值模拟,通过对大量计算结果的总结和分析,使计算模型具有一般性,从而最终达到对量水槽进

行改进和优化的目的。
2)试验表明,弧底梯形渠道无喉道量水槽具有阻水小,流量计算公式简捷,水头损失小的优点,临界淹没度可达 0.89,表明弧底梯形渠道无喉道量水槽是适合弧底梯形渠道流量测流的新型量水设备。
3)本研究分析了不同尺寸形状的弧底梯形渠道无喉道量水槽自由出流条件下的水位流量关系,得出流量与相对水头(上游水位与量水槽顺水流长度

之比)、量水槽收缩比有关,由此建立了弧底梯形渠道无喉道量水槽的理论流量计算经验公式,公式简捷易用,且满足一定的精度要求,便于向灌区推广应用。

[参考文献]

- [1] 蔡 勇,周明耀. 灌区量水实用技术指南 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
Cai Y, Zhou M Y. A practical guide to irrigation water measurement technology [M]. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 张志昌. U 形渠道量水设施综述 [J]. 西安理工大学学报, 1995 (3): 214-219.
Zhang Z C. Summary on flow measurement facilities of the U-shaped channel [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1995(3): 214-219. (in Chinese)
- [3] 王正中,申正康,彭原平,等. 弧底梯形明渠临界水深的直接算法 [J]. 长江科学院报, 2005, 22(3): 6-8.
Wang Z Z, Shen Z K, Peng Y P, et al. Direct formula calculating critical depth for open trapezoidal channel with Spherical Bed [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(3): 6-8. (in Chinese)
- [4] Skogerboe G V, Hyatt M L. Rectangular cutthroat flow measuring flumes [J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 1967(4): 1-13.
- [5] 王 智,朱凤书,刘晓明. 平底抛物线形无喉段量水槽试验研究 [J]. 水利学报, 1994(7): 12-23.
Wang Z, Zhu F S, Liu X M. Experimental study on flat parabolic throatless flume for flow measurement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(7): 12-23. (in Chinese)
- [6] 吴景社,朱凤书,康绍忠,等. U 形渠道适宜量水设施及标准化研究 [J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 38-41.
Wu J S, Zhu F S, Kang S Z, et al. Research on the suitable flow measurement facilities and standardization for U-shaped channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(2): 38-41. (in Chinese)
- [7] Keller R J. Cut throat flume characteristics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(9): 1248-1263.
- [8] 王福军. CFD 在水力机械湍流分析与性能预测中的应用 [J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(4): 75-80.
Wang F J. Application of CFD to turbulent flow analysis and performance prediction in hydraulic machinery [J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(4): 75-80. (in Chinese)
- [9] 郝晶晶,马孝义,王波雷,等. 基于 VOF 的量水槽流场数值模拟 [J]. 灌溉排水学报, 2008(4): 26-29.
Hao J J, Ma X Y, Wang B L, et al. Numerical simulation of flow field in flow measuring flume based on VOF method [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008(4): 26-29. (in Chinese)
- [10] 尹京川,马孝义,胡杰华,等. 矩形无喉段量水槽水力特性数值模拟研究 [J]. 中国农村水利水电, 2011(6): 98-100.
Yin J C, Ma X Y, Hu J H, et al. Numerical simulation research on hydraulic characteristics of rectangular throatless measuring flume [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(6): 98-100. (in Chinese)
- [11] 程香菊,罗 麟,赵文谦,等. 阶梯溢流坝自由表面掺气特性数值模拟 [J]. 水动力学研究与进展(A), 2004, 19(2): 152-157.
Cheng X J, Luo L, Zhao W Q, et al. Numerical simulation of characteristics of free-surface aeration on stepped spillway [J]. Journal of Hydrodynamics(A), 2004, 19(2): 152-157. (in Chinese)
- [12] 胡云进,万五一,蔡甫款,等. 窄深矩形断面明渠流速分布的研究 [J]. 浙江大学学报:工学版, 2008, 42(1): 183-187.
Hu Y J, Wan W Y, Cai F K, et al. Velocity distribution in narrow and deep rectangular open channels [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(1): 183-187. (in Chinese)
- [13] 刘玉玲,吕 彬,魏文礼. 氧化沟推流转轮半径对水流回流区长度影响的数值模拟 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2014, 42(2): 229-234.
Liu Y L, Lü B, Wei W L. 3D numerical simulation of the influence of flow runner radius on the length of flow recirculation in an oxidation ditch [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2014, 42(2): 229-234. (in Chinese)
- [14] 吴持恭. 水力学 [M]. 4 版. 北京:高等教育出版社, 2007: 271-281.
Wu C G. Hydraulics [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2007: 271-281. (in Chinese)
- [15] 吕宏兴,余国安,陈俊英,等. 矩形渠道半圆柱形简易量水槽试验研究 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 81-84.
Lü H X, Yu G A, Chen J Y, et al. Experimental research on simple semicircular cylinder measuring-flume in rectangular canal [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(6): 81-84. (in Chinese)
- [16] 吕宏兴,刘焕芳,朱晓群,等. 机翼形量水槽的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 119-123.
Lü H X, Liu H F, Zhu X Q, et al. Experimental research on airfoil-shaped flow flume [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(9): 119-123. (in Chinese)